

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ВИБРОВОЗМУЩЕНИЙ

КОЛОБОВ А.Б., МАСЛОВ Л.Б., ОГУРЦОВ Ф.Б., ШАПИН В.И., кандидаты техн. наук, БЕЛОВ И.А., асп.

Рассматриваются вопросы расчета напряженно-деформированного состояния трубопроводов по результатам конечно-элементного моделирования и вибромониторинга для решения прикладных задач вычислительной и экспериментальной вибротехники в энергетике.

Существующие в настоящее время методы оценки надежности трубопроводов построены без достаточного учета их колебательных процессов [1,2]. Однако вибрационные нагрузки могут оказывать весьма существенным фактором истощения живучести трубопроводов, эксплуатируемых с невыявленными трещинами [3].

Особенно опасными могут быть непроектные ситуации, когда возникают резонансные или близкие к резонансным пространственные изгибно-крутильные колебания трубопровода. Основным источником вибрации является спектр колебаний теплоносителя при движении по трассам упругих трубопроводов с природоимпульсной причиной вибровоздействия параметрического или автоколебательного характера.

В качестве сопутствующего фактора выступают элементы опорно-подвесной системы, как способствующие при определенных условиях потере виброустойчивости конструкции в целом.

Существует и другая сторона проблемы. Метрологический аспект таких виброобследований

определен тем, что применяемая виброаппаратура в области частот ниже 5 Гц дает недостоверные результаты. Проблема заключается в отсутствии надежных средств измерения вибрации в области инфранизких частот, которая прогнозируется как зона наиболее опасных возможных резонансных состояний трубопроводов.

В качестве примера решения задачи идентификации комбинированного напряженно-деформированного состояния рассматривается пространственная стержневая конечно-элементная модель трубопровода основного конденсата блока ВВЭР-440 Кольской АЭС (рис.1).

Предварительно выполнялся расчет резонансных частот и форм колебаний трубопровода.

В качестве конечного элемента используется стандартный 2-узловой элемент, имеющий шесть степеней свободы в узле (три компоненты вектора перемещений и три угла поворота), работающий на растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение (рис.2).

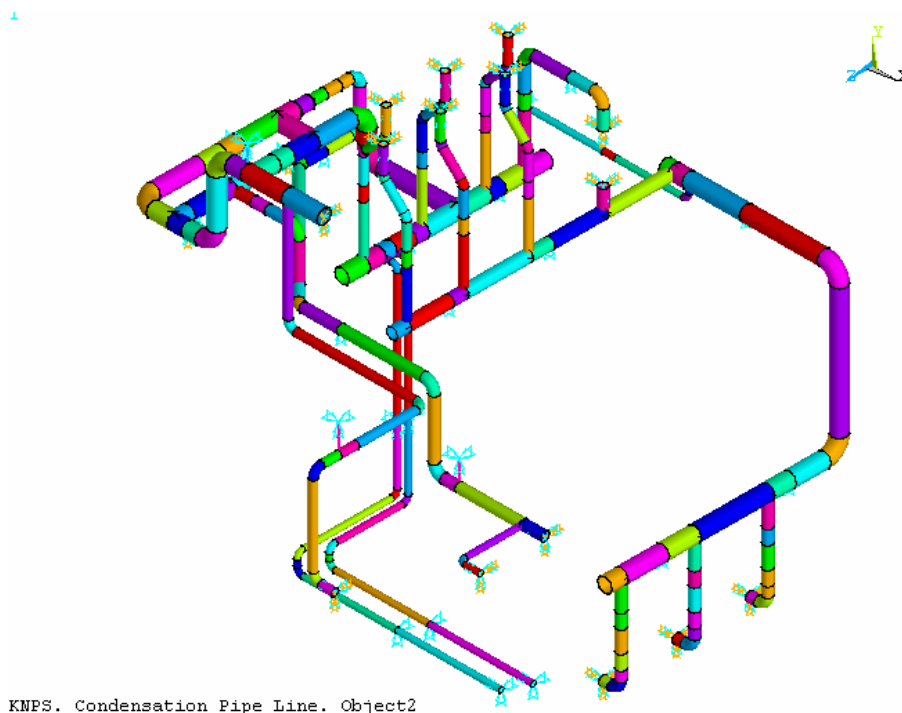


Рис.1. Конечно-элементная модель трубопровода основного конденсата

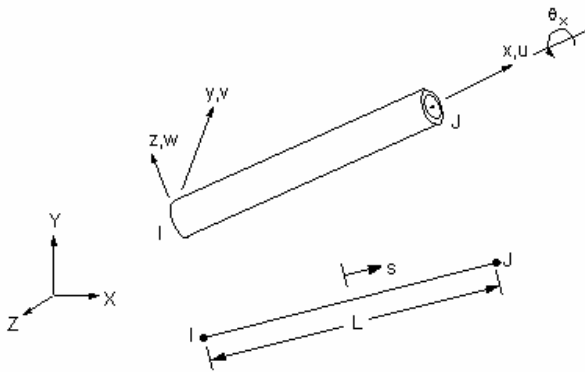


Рис.2. Схема используемого в решении стержневого конечного элемента

Интерполяционные соотношения, задающие изменение компонент перемещений точек стержня u, v, w вдоль оси стержня, имеют вид [4]:

$$u = \frac{1}{2}(u_I(1-s) + u_J(1+s))$$

$$v = \frac{1}{2}\left(v_I\left(1 - \frac{s}{2}(3-s^2)\right) + v_J\left(1 + \frac{s}{2}(3-s^2)\right)\right) + \frac{L}{8}\left(\theta_{z,I}(1-s^2)(1-s) - \theta_{z,J}(1-s^2)(1+s)\right)$$

$$w = \frac{1}{2}\left(w_I\left(1 - \frac{s}{2}(3-s^2)\right) + w_J\left(1 + \frac{s}{2}(3-s^2)\right)\right) - \frac{L}{8}\left(\theta_{y,I}(1-s^2)(1-s) - \theta_{y,J}(1-s^2)(1+s)\right)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2}(\theta_{x,I}(1-s) + \theta_{x,J}(1+s))$$

где L – длина элемента, s – локальная координата вдоль оси стержня, u_I, v_I, w_I и u_J, v_J, w_J – линейные перемещения узлов конечного элемента в локальной системе координат (x, y, z) , жестко связанной с элементом, $\theta_{x,I}, \theta_{y,I}, \theta_{z,I}$ и $\theta_{x,J}, \theta_{y,J}, \theta_{z,J}$ – угловые перемещения узлов конечного элемента в локальной системе координат.

Линейные размеры трубопровода и характеристики сечений соответствовали проектным значениям.

Параметры материала труб (сталь марки 20, МРТУ 14-4-21-67) принимались следующими: модуль упругости – $2,0 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона – 0,3; плотность – 7800 кг/м^3 .

Конечно-элементная модель трубопровода геометрически разделялась на две основные секции: от конденсатных электронасосов (КЭН) до эжекторов – первая, от эжекторов до ПНД-1 (подогреватель низкого давления) – вторая секция. Мо-

дель учитывала наличие криволинейных элементов, задвижек и переходов между трубами различных диаметров согласно стандарту МВН и характеристикам соответствующих конструктивных элементов. Учитывалось наличие конденсата в трубе с плотностью 1000 кг/м^3 , а также следующие виды опор:

- пружинные опоры с двумя тягами и известными жесткостями;
- жесткие опоры, фиксирующие все степени свободы в соответствующем узле и моделирующие границы регистрации трубопровода;
- жесткие опоры, фиксирующие четыре степени свободы в соответствующем узле (поперечные перемещения и углы поворота в плоскостях, проходящих через продольную ось трубы) и моделирующие скользящие опоры;
- жесткие подвески, запрещающие перемещения в вертикальном направлении и вращение труб вокруг собственных осей.

Разработка модели и расчет собственных колебаний трубопровода был выполнен в системе конечно-элементного анализа ANSYS, ANSYS Inc. [5].

В результате расчета определены 20 низших значений собственных частот колебаний трубопровода основного конденсата блока ВВЭР-440 Кольской АЭС и соответствующие формы колебаний, перекрывающие частотный диапазон до 20 Гц.

На рис. 3, 4 приведены схемы возможных форм колебаний.

Анализ собственных частот и форм колебаний трубопровода основного конденсата показал наличие достаточно плотного спектра в двух низкочастотных подобластях. С точки зрения диагностики наиболее опасных участков трубопровода представляет интерес лишь ограниченное число частот и форм колебаний трубы Ду400, ведущей к конденсатным насосам, и трубы Ду300, ведущей к эжекторам. Отдельного рассмотрения в процессе вибромониторинга требуют вибрации трубы Ду250, находящейся под разряжением конденсата.

Геометрический анализ собственных форм колебаний позволяет спрогнозировать характерные участки трубопроводов с максимальными виброперемещениями в резонансном состоянии для проведения натурального вибромониторинга.

В рамках постановки задачи рассматривается проблема создания виброизмерительных средств в инфранизкочастотной области, поскольку обозначенные частоты собственных колебаний объектов исследования сориентированы на диапазон от 0,5 до 20 Гц в порядке возрастания собственных форм.

Как показал предварительный анализ, для корректного исследования возможных первых форм колебаний необходимо получить информацию о траектории движения трех–шести точек по всем возможным степеням свободы. Автоматизированная система должна позволять синхронное измерение виброперемещений при использовании многокоординатных датчиков абсолютной вибрации. В соответствии с изложенными требованиями для мониторинга трубопроводов был разработан и изготовлен комплекс «Циклон» (ИГЭУ), функциональная схема которого представлена на рис.5.

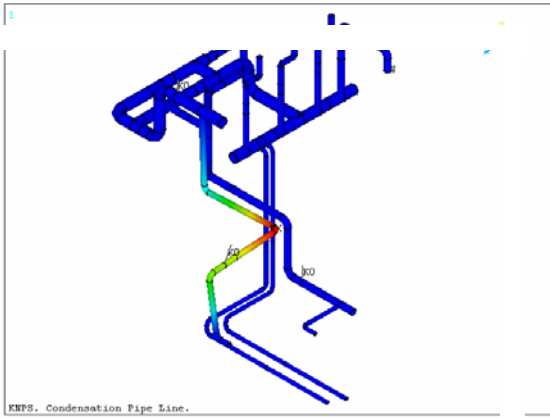


Рис.3. Форма 1, частота 5.2948 Гц

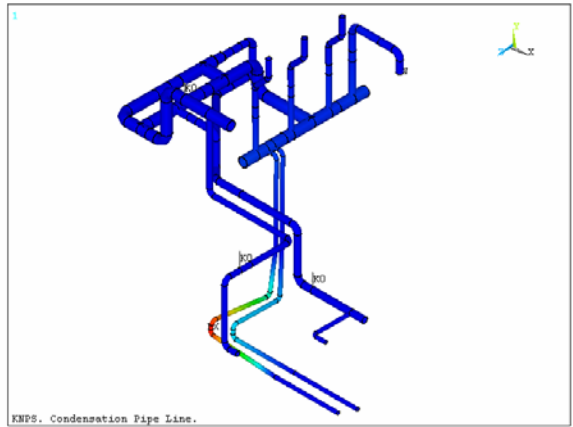


Рис.4. Форма 2, частота 6.5258 Гц

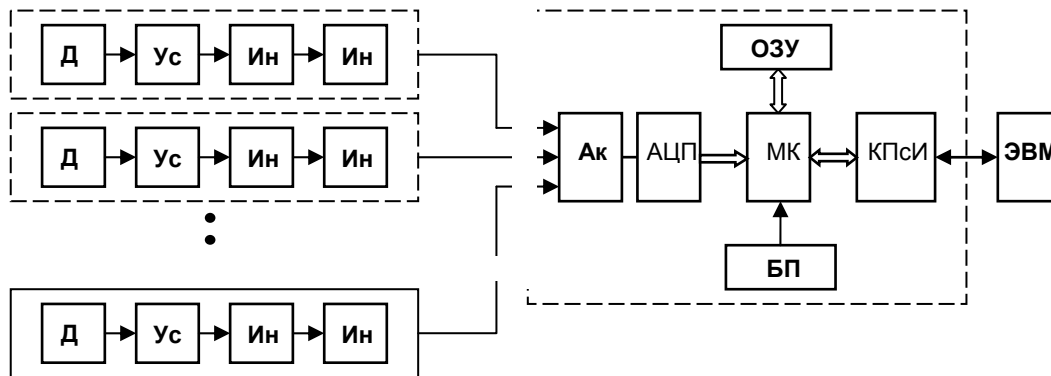


Рис.5. Функциональная схема автоматизированного измерительного комплекса

Технически комплекс реализован в двух уровнях и включает в себя автономный блок первичного сбора информации на базе микроконтроллера и управляющей персональной ЭВМ типа Notebook, выполняющей функции обработки и хранения результатов измерения. Связь между автономным блоком и ЭВМ осуществляется с помощью последовательного интерфейса RS-232 по трехпроводному кабелю длиной до 15 м.

Комплекс работает следующим образом. Датчики Д, реализованные на базе инфранизкочастотных тензорезисторных акселерометров, устанавливаются с помощью магнитных насадок в исследуемых точках трубопровода. Сигналы с датчиков поступают на блоки предварительной обработки сигнала, включающие в себя предварительный усилитель (Ус) и два аналоговых интегратора. Сигнал на выходе интеграторов пропорционален виброперемещению в исследуемой точке. Коррекция фазовых погрешностей интеграторов в инфранизкочастотной области осуществляется программно. Всего в системе предусмотрена возможность использования до 32 каналов измерения по одной координате, что позволяет оперативно менять схемы измерений и варьировать числом измеряемых координат в одной

точке за счет установки датчиков на различные приспособления.

Сигналы с блоков предварительной обработки поступают на вход 32-канального аналогового коммутатора (АК) и далее на аналоговоцифровой преобразователь (АЦП). Направляющий микроконтроллер МК осуществляет пересылку дискретизированного сигнала в оперативную память (ОЗУ), а также обмен данными через контроллер последовательного интерфейса (КПСИ) с ЭВМ верхнего уровня. Блок питания (БП) включает в себя аккумуляторную батарею, автономный инвертор, выпрямители и стабилизаторы.

Программное обеспечение ЭВМ и микроконтроллера позволяет устанавливать конфигурацию измерительной системы (количество и порядок опроса датчиков вибрации), частоту дискретизации сигналов и количество точек дискретизации (размер выборки).

Объем оперативной памяти позволяет сохранять 4096 дискретных отсчетов при 32 измерительных каналах, что соответствует времени наблюдения колебательных процессов порядка 10 с при частоте дискретизации 400 Гц и разрешающей способности при спектральном анализе сигнала 0,1 Гц.

При определении напряженно-деформированного состояния трубопровода в качестве источников вибрации трубопровода принимались колебания конденсатных электронасосов с частотой и амплитудой, полученными в результате виброобследования. В расчете напряженно-деформированного состояния учитывалась только первая наиболее энергоемкая основная гармоника, поскольку амплитуды перемещений на высших гармониках на порядок меньше.

Вибрационное обследование трубопровода основного конденсата проводилось с использованием комплекта разработанной измерительной аппаратуры и заключалось в измерении параметров вибрации в двух или трех ортогональных направлениях в пролетах и на опорах.

На рис.6,7 приведены примеры опытной осциллограммы и спектра амплитудно-частотного распределения на впуске конденсатного электронасоса (КЭН).

Приведенные осциллограмма и спектрограмма показаны в масштабе частоты 4000 единиц = 915 Гц и в масштабе виброскорости: 130 единиц = 6 мм/с.

Для всех полученных осциллограмм характерно наличие в области 655 единиц 150 герцовой вибрации, отвечающей лопаточной частоте, равно как и оборотной в области 82-123 единиц с последующими спектральными переходами в зависимости от изменения положения трубопровода и локальных систем отсчета, по отношению к глобальной системе: x, y, z рис.1.

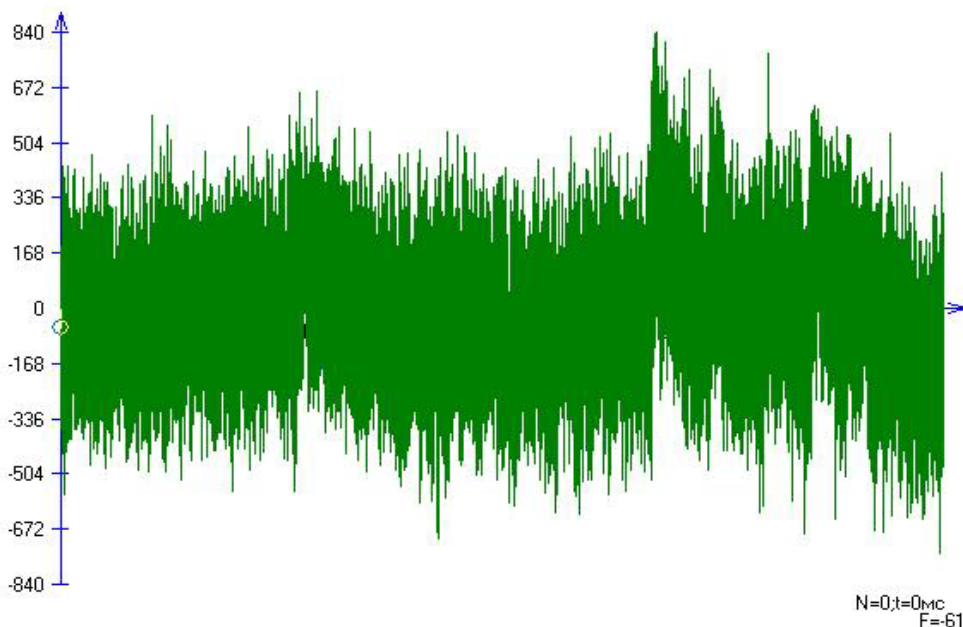


Рис.6. Виброскорость на впуске конденсатного насоса КЭН

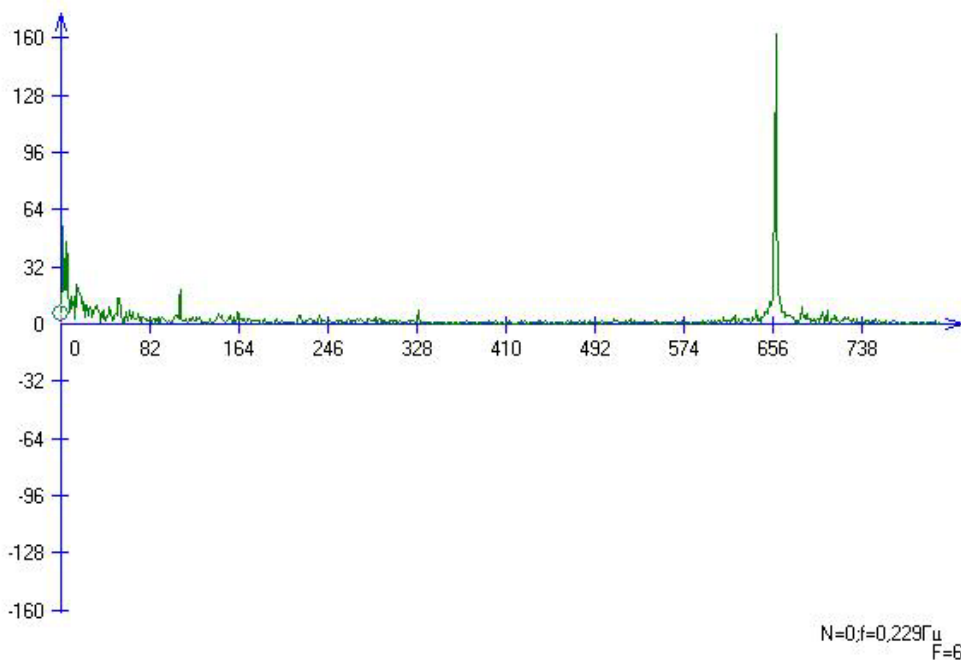


Рис.7. Амплитудный спектр виброскорости на впуске конденсатного насоса КЭН

В результате расчета определены напряжения и перемещения в конечно-элементной модели. Распределение эквивалентных, по Мизесу, динамических напряжений [6,7] представлено на рис. 8. Максимальное напряжение определено в 32 МПа.

Распределение перемещений приведено на рис. 9. Аналогично определены напряжения при статическом нагружении трубопровода под действием собственного веса конструкции и теплоносителя.

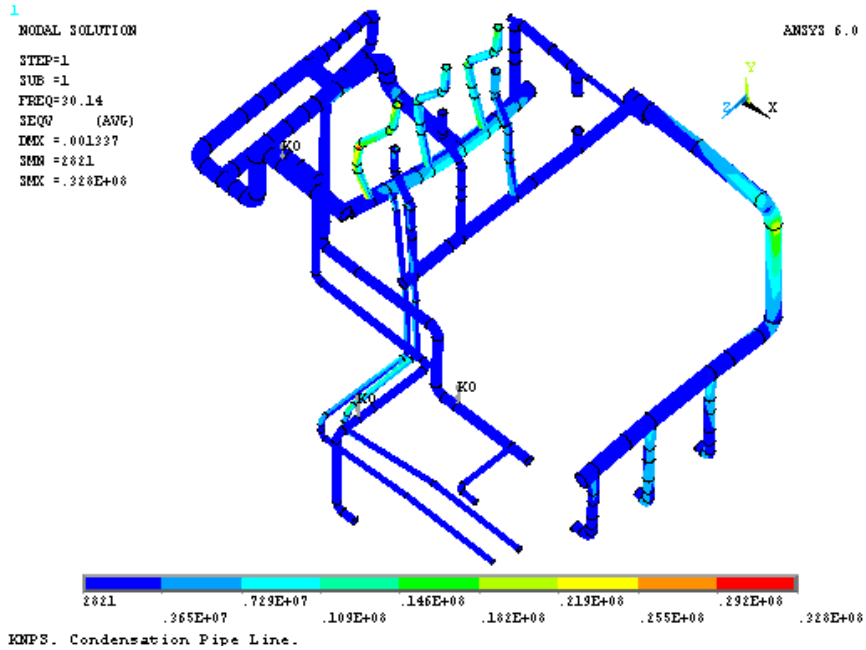


Рис 8. Вынужденные колебания. Эквивалентные напряжения.

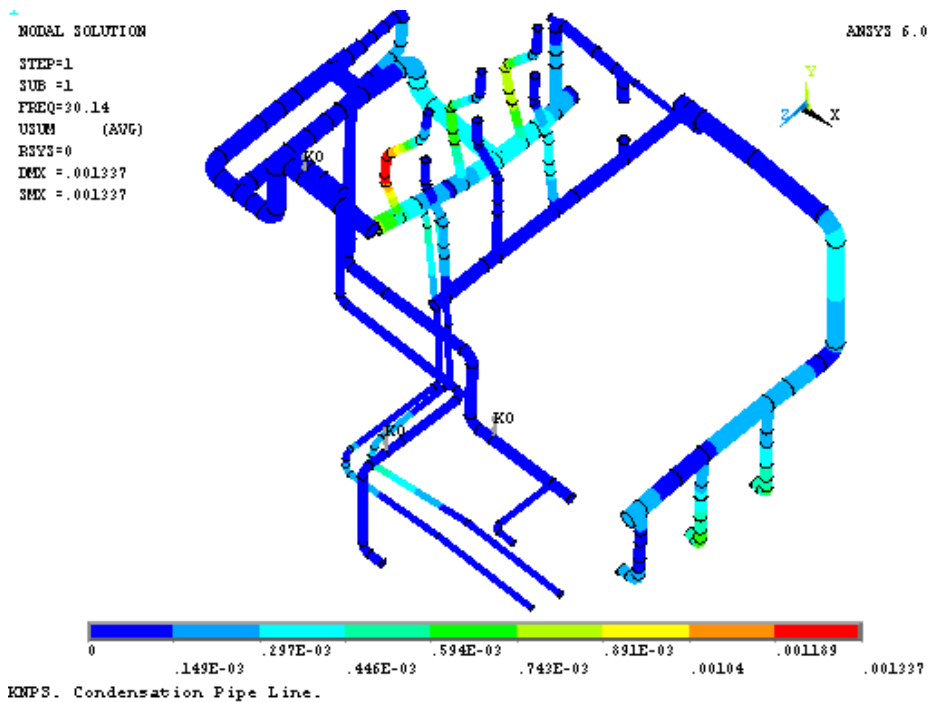


Рис 9. Вынужденные колебания. Суммарные перемещения.

Полученные результаты определяют следующие рекомендации по организации периодического вибромониторинга:

1. Плановое периодическое (с интервалом 1–1,5 месяца) измерение абсолютных и разностных среднеквадратичных значений (СКЗ) виброперемещений и виброскорости персоналом турбинного отделения при соблюдении постоянства режимных параметров работы. При этом подготовка контрольных точек, их маркировка и правила измерения вибропараметров должны проводиться в соответствии с инструкцией по эксплуатации разработанного инфранизкочастотного виброметра VD-200MT комплекса «Циклон».

2. Ведение журнала учета результатов измерений в представленных контрольных точках в рекомендуемых направлениях измерений и построение трендов изменения измеренных параметров от времени контроля.

3. Критерием предельной вибрации трубопровода считать:

– резкое одновременное изменение измеряемых параметров СКЗ виброперемещения и виброскорости по сравнению с предыдущим измерением более чем в 2 раза при постоянстве режимных рабочих параметров и отличии температуры окружающего воздуха не более чем на $+5^{\circ}\text{C}$;

– превышение измеренных значений СКЗ вибропараметров над предельными значениями в большинстве контрольных точек участков трубопровода одновременно по всем направлениям контроля.

В указанных случаях необходимо принимать меры по снижению вибрации путем определения причины повышения виброактивности системы и

использования пассивных или следящих активных систем виброзащиты.

Таким образом, используя конечно-элементную модель и результаты натурного вибромониторинга трубопровода основного конденсата блока ВВЭР-440 АЭС с использованием разработанной автоматической многоканальной виброизмерительной аппаратуры «Циклон», включающей виброприемники инфранизкочастотного спектра, получены распределения напряжений и перемещений от собственного веса и вибровоздействия. Предложены рекомендации по организации периодического вибромониторинга с указанием предельных СКЗ вибропараметров в контрольных точках замера.

Список литературы

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: Утв. Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. РД ЭО-0185-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС. – М., 1999. – 62 с.
3. Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций / Ю.Л. Израилев, А.Я. Копсов, Ф.А. Хромченко и др. – М.: Изд. Торус пресс, 2002. – 616 с.
4. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541с.
5. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. 1998.
6. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 1975. – 476 с.
7. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высш. шк., 1968. – 512 с.